Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 16, No. 1, June 2025, pp. 193-213

Original Research
Homepage: https://ijpr.um.ac.ir

https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.93091.1111

Quantification of Pretreatment Effects of Potassium Silicate on Germination and Growth Indices of Faba Bean (*Vicia faba* L.) under Salinity Stress Using Empirical Models

Qais Fahd Hussein [1], Ali Hatami [1], Alireza Taab [1*], Nabil Rahim Lahmod [2], Somayeh Hajinia [1]

Received: 20-04-2025 Revised: 20-05-2025 Accepted: 25-05-2025 Available Online: 25-05-2025	**Cite this article:** Fahd Hussein, Q., Hatami, A., Taab, A., Rahim Lahmod, N., & Hajinia, S. (2025). Quantification of pretreatment effects of potassium silicate on germination and growth indices of faba bean (*Vicia faba* L.) under salinity stress using Empirical models. *Iranian Journal of Pulses Research*, *16*(1), 193-213. (In Persian with English Abstract). https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.93091.1111

Introduction
Salinity stress is one of the limiting factors for plant growth and production in arid and semi-arid regions of the world. The use of potassium silicate as the second most common element in soil is one of the strategies used to reduce the effects of environmental stresses such as salinity. Considering the increasing challenge of water and soil salinity and its limiting effects on the growth, development, and production of faba bean, the aim of this study was to investigate the effects of potassium silicate on improving germination and growth indices, and to determine the tolerance threshold of faba bean seeds to salinity stress.

Materials and Methods
A factorial experiment was conducted based on completely randomized design with four replications at the Laboratory of Ilam University, Iran, in 2024. The experimental factors were included potassium silicate at four levels (0, 50, 100, and 150 mg.l^{-1}) and five levels of salinity stress (0, 1, 4, 8, and 10 dS.m^{-1}). The germination criterion was the protrugen of a radicle length up to 2 mm. At the end of the experiment, germination indices (germination percentage, germination rate, seed vigor index) and seedling growth (root and seedling dry weight and length) were measured.

Results and Discussion
The application of potassium silicate under non-salinity stress conditions (salinity of 0 and 1 dS.m^{-1}) had no significant effect on the germination percentage of faba bean seeds; however, the germination percentage increased by 20.7, 23.8, and 26.7 percent with the application of 150 mg.l^{-1} of potassium silicate under salinity stress conditions of 4, 8, and 10 dS.m^{-1}, respectively. The germination rate of faba bean seeds under non-salt stress conditions was not affected by pretreatment with potassium silicate. The germination rate of faba bean seeds with application of 150 mg.l^{-1} of potassium silicate under salinity stress conditions of 8 and 10 dS.m^{-1} was 23.9 and 26.7 percent higher than without its application, respectively. Under non-salinity stress conditions, application of 100 mg l^{-1} potassium silicate increased the vigor index of faba bean seeds by 25.4% compared to the control. Under salinity stress conditions of 8 dS.m^{-1}, application of 50 and 150 mg l^{-1} potassium silicate improved the vigor index of faba bean seeds by 73.7% and 79.0%, respectively. Salinity stress at levels of 1, 4, 8, and 10 dS.m^{-1} reduced the length of faba bean rootlets by 21.8, 39.7, 44.2, and 60.0%, respectively, compared to the absence of salinity stress. The highest shoot dry weight (0.414 g.plant^{-1}) was observed with the application of 100 mg.l^{-1} potassium silicate under non-salt stress conditions, which was 8.5% higher compared to the control. Under 10 dS.m^{-1} salt stress conditions, the application of 100 and 150 mg.l^{-1} potassium silicate improved the shoot dry weight of faba bean by 86.5 and 66.5% compared to the control. The highest root dry weight (0.419 g.plant^{-1}) was observed with the application of 100 mg.l^{-1} potassium silicate under no salt stress conditions, which was 11.5% higher compared to control. Under 10 dS.m^{-1} salt stress conditions, the application of 100 and 150 mg l^{-1} potassium silicate improved the dry weight of faba bean root by 60.1 and 65.6% compared to the control. According to the Moss and

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
2- Faculty of Agriculture, University of Wasit, Iraq
* Corresponding Author: a.taab@ilam.ac.ir

Hoffman's equation, the tolerance threshold to salinity stress in faba bean based on relative germination without the application of potassium silicate was 0.52 and its decreasing slope was 5.48. The threshold of tolerance to salinity stress in faba bean with the application of 50, 100, and 150 mg.l^{-1} of potassium silicate was 0.62, 0.22, and 1.32 and its decreasing slope was 5.5, 93.4, and 22.4, respectively. Based on the three-parameter sigmoid model, the salinity stress that reduced bean seed germination by 50% by applying different amounts of 0, 50, 100, and 150 mg.l^{-1} of potassium silicate was 8.75, 9.41, 9.38, and 10.10 dS.m^{-1}, respectively.

Conclusions
It can be concluded that the faba bean plant is sensitive to salinitySeed priming with potassium silicate at concentrations of 100 and 150 mg.l^{-1} effectively mitigates salt stress in faba bean and significantly enhances the plant's tolerance to salinity.

Keywords: Germination percentage, Modeling, Saline water, Silicon

نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران
جلد ۱۶، شمارۀ ۱، نیمۀ اول ۱۴۰۴، ص. ۲۱۳-۱۹۳

نوع مقاله: پژوهشی
Homepage: https://ijpr.um.ac.ir

https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.93091.1111

کمّی‌سازی اثرات پرایمینگ بذر با پتاسیم سیلیکات بر صفات جوانه‌زنی و شاخص‌های رشد باقلا (*Vicia faba* L.) تحت تنش شوری با استفاده از مدل‌های تجربی

قیس فهد حسین [1]، علی حاتمی [1]، علیرضا تاب [1*]، نبیل رحیم لهمود [2]، سمیه حاجی‌نیا [1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

چکیده

تنش شوری یکی از عوامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. کاربرد پتاسیم سیلیکات به‌عنوان دومین عنصر رایج موجود در خاک، یکی از راهکارهای مورد استفاده در کاهش اثر تنش‌های محیطی مانند شوری شناخته شده است. در این پژوهش، اثرات پرایمینگ با پتاسیم سیلیکات بر خصوصیات جوانه‌زنی بذر و شاخص‌های رشد باقلا تحت شرایط تنش شوری در آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه دانشگاه ایلام در بهار سال ۱۴۰۳ انجام گردید. عوامل آزمایش شامل پتاسیم سیلیکات در چهار سطح (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات) و پنج سطح تنش شوری شامل (۰، ۱، ۴، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. نتایج نشان داد که تحت شرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه به‌ترتیب به‌میزان ۲۶/۷، ۲۶/۷، ۴۴/۱، ۶۶/۵ و ۶۵/۶ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن می‌شود. براساس معادله ماس و هافمن، حد آستانه تنش شوری در باقلا با کاربرد ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات به‌ترتیب ۰/۵۲، ۰/۶۲، ۰/۲۲ و ۱/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر و شیب کاهش آن نیز ۵/۴۸، ۵/۱۷، ۴/۹۳ و ۴/۲۲ بود. براساس مدل نمایی، بیشترین درصد جوانه‌زنی بذر باقلا با کاربرد ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات به‌ترتیب ۸۹/۳۳، ۹۴/۹۴، ۹۷/۴۸ و ۹۴/۷۷ به دست آمد. براساس مدل سه پارامتری سیگموئیدی، سطحی از تنش شوری که باعث کاهش ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذر باقلا می‌شود با کاربرد ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات به‌ترتیب ۸/۷۵، ۹/۴۱، ۹/۳۸ و ۱۰/۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که گیاه باقلا یک گیاه حساس به شوری است. به‌طور کلی، پرایمینگ بذر با پتاسیم سیلیکات با غلظت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر، توانایی کاهش اثرات تنش شوری در باقلا را دارد و می‌تواند در افزایش تحمل گیاه باقلا در برابر تنش شوری نقش مهمی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آب شور، درصد جوانه‌زنی، سیلیکون، مدل‌سازی

مقدمه

در حال حاضر، جهان یکی از بزرگ‌ترین بحران‌های تاریخی مدرن را تجربه می‌کند که با تغییرات آب‌وهوایی عمده و کاهش شدید تولیدات کشاورزی نمایان می‌شود (Anderson et al., 2020). تنش شوری جزء تنش‌های غیرزیستی مهم است که اثرات مضری بر رشدونمو گیاه از جوانه‌زنی بذر تا عملکرد دارد (El-Mogy et al., 2018). شوری مشکلی جهانی است که بیش از شش درصد از مساحت زمین‌های جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حدود ۲۰ درصد از کل زمین‌های قابل کشت و ۵۰ درصد از زمین‌های زیرکشت گیاهان زراعی را شامل می‌شود که حدود ۳۳ درصد از سطح مزارع آبی را تشکیل می‌دهد (Dagar et al., 2019). زمین‌های شور به‌دلیل فعالیت‌های انسانی، تغییرات آب‌وهوایی و تغییرات فصلی به‌طور نگران‌کننده‌ای در حال افزایش هستند (Shen et al., 2020). شوری احتمالاً چالش تأمین نیازهای غذایی جهان را تشدید می‌کند، زیرا بیشتر محصولات زراعی مستعد تنش شوری هستند (Mustafa et al., 2019).

باقلا (*Vicia faba* L.) متعلق به خانواده بقولات (Fabaceae) است و در سراسر جهان از جمله منطقه مدیترانه تولید می‌شود. میزان پروتئین دانه‌های باقلا بین ۱۸ تا ۳۵

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه واسط، عراق
(*- نویسنده مسئول: a.taab@ilam.ac.ir)

درصد ماده خشک است (Abdelkader et al., 2022). باقلا به‌دلیل ویژگی تثبیت نیتروژن به‌عنوان یک محصول پایدار شناخته شده است (Maalouf et al., 2021) که از آن برای بهبود حاصلخیزی خاک و حمایت از تولید پایدار سایر محصولات، به‌ویژه هنگامی‌که با غلات، گیاهان غده‌ای و سبزیجات در تناوب قرار می‌گیرد، استفاده می‌کنند. چنین سیستم تناوبی، کیفیت غذا را تضمین می‌کند و سلامت خاک را افزایش می‌دهد و در نتیجه باقلا را می‌توان به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از شیوه‌های کشاورزی پایدار در سراسر جهان معرفی نمود (Johnston et al., 2024). باقلا به‌عنوان یک گیاه نیمه‌حساس به شوری، دارای حد آستانه تحمل به شوری ۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر با شیب کاهش ۹/۶ درصد است (Maas & Grattan, 1999). هر گونه افزایش بیشتر در شوری خاک به‌طور قابل‌توجهی عملکرد باقلا را کاهش می‌دهد و زمانی‌که سطح شوری خاک پنج دسی‌زیمنس بر متر است، ۵۰ درصد کاهش عملکرد را باعث می‌شود (Sahab et al., 2021). افضل و همکاران (Afzal et al., 2022) گزارش کردند که در باقلا مرحله جوانه‌زنی بذر نسبت به سایر مراحل رشد به تنش شوری حساس‌تر است.

ازآنجایی‌که جوانه‌زنی بذر و مراحل اولیه نمو گیاهچه حیاتی‌ترین و حساس‌ترین مراحل در طول چرخه زندگی گیاه هستند (Cafaro et al., 2023)، شور شدن خاک یک مانع عمده در رشد گیاه محسوب می‌شود (Zhou et al., 2024). کاهش در دسترس بودن آب، عدم تعادل یونی، تغییر در نقل و انتقال ذخایر غذایی بذر، و تغییرات در بخش ساختاری پروتئین، برخی از اثرات تنش شوری بر جوانه‌زنی بذر هستند (El Boukhari et al., 2021). آب شور ممکن است توانایی بذر برای جذب آب (تنش اسمزی) را کاهش دهد و باعث عدم تعادل یونی در دانه (تنش یونی) شود که در نهایت باعث اختلال در جوانه‌زنی و جلوگیری از استقرار یکنواخت محصول می‌شود (De la Reguera et al., 2020). سازگاری گیاهان با محیط شور در طول مراحل رشد، به‌خصوص در مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه، برای استقرار گیاهان بسیار مهم است. شروع جوانه‌زنی در بذرهای گیاهان حساس به‌دلیل تنش شوری به تأخیر می‌افتد (Ibrahim, 2016).

تحمل به تنش شوری در طول جوانه‌زنی برای استقرار و رشد گیاهان در خاک‌های شور امری بدیهی است. مدیریت شوری مبتنی بر محصول در مقایسه با راهبردهای مدیریت خاک و آبیاری که بسیار گران هستند، رویکردی کارآمدتر و اقتصادی‌تر برای کاهش شوری است (Sehrawat et al., 2020). پرایمینگ بذر یک روش قدیمی است که ثابت شده است به‌عنوان یک رویکرد پیش از کاشت ارزان، کارآمد، عملی و ایمن برای مبارزه با رشد و محدودیت رشد گیاهان ناشی از شوری و ترویج تولید محصول مقرون‌به‌صرفه و پایدار در خاک تحت تأثیر شوری است (Farooq et al., 2017a).

سیلیس دومین عنصر فراوان در خاک محسوب می‌شود که میزان آن از ۵۰ تا ۴۰۰ گرم در کیلوگرم خاک متغیر است و ۲۵ درصد از کل پوسته زمین را پوشش می‌دهد (Zaid et al., 2018). هر چند که سیلیکون یک عنصر غذایی غیرضروری برای رشد گیاهان است، امّا می‌تواند برای گیاهان زراعی در برابر تنش شوری مقاومت ایجاد کند. سیلیکون می‌تواند جوانه‌زنی، رشد، محتوای نسبی آب، عملکرد و همچنین کیفیت بذر را در محصولات افزایش دهد. مطالعات نشان دادند که محصولات تیمارشده با سیلیکون دارای محتوای کلروفیل و کارآیی سیستم فتوسنتزی بالاتر و پراکسیداسیون لیپیدی و نشت الکترولیت کمتری هستند (Dhiman et al., 2021). سازوکارهای تحمل نمک با واسطه سیلیکون در مرحله جوانه‌زنی بذر هنوز مبهم است، امّا پیشنهاد شده است که با کاهش تنش اکسیداتیو مرتبط هستند (Karunakaran et al., 2013). به‌عنوان مثال، گزارش شده است که سیلیکون، مقدار یون‌های سدیم را در گیاهان در طول سمیت شوری از طریق روش‌های مختلف کاهش می‌دهد. در مرحله اول، می‌تواند نفوذپذیری غشاء سلولی ریشه را تغییر دهد تا ثبات ساختاری سلول‌های ریشه را بازیابی کند (Luyckx et al., 2017). در مرحله دوم، می‌تواند عملکرد پمپ H^+-ATP_{ases} واقع بر غشاء پلاسما را بهبود دهد و سوم اینکه می‌تواند انتقال یون سدیم به خارج از سلول‌ها را تسهیل کند.

برخی از محققان، نقش پتاسیم سیلیکات را در کاهش اثرات تنش شوری در گیاهان گزارش کردند. لطفی و همکاران (Lotfi & Ghassemi-Golezani, 2015) گزارش کردند که تحت تنش شوری در ماش (*Vigna radiate* L.)، کاربرد سیلیکون و اسید سالیسیلک از طریق افزایش ذخیره پتاسیم و کاهش تجمع سدیم در بذر باعث بهبود کیفیت فیزیولوژیکی بذر می‌شود. شاهزاد و همکاران (Shahzad et al., 2013) نشان دادند که شوری بالا باعث افزایش غلظت یون سدیم در آپوپلاست برگ باقلا شده و با افزودن سیلیکون به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. صباغنیا و جان‌محمدی (Sabaghnia & Janmohammadi, 2014) گزارش کردند که کاربرد نانوذرات سیلیکون یک میلی‌مولار اثرات منفی تنش شوری بر سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه و اندام هوایی و وزن گیاهچه عدس (*Lens culinaris* Medic.) را کاهش می‌دهد. در گیاهان لوپین تحت تنش شوری، استفاده از نانوذرات سیلیکون

باعث کاهش پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدئید و نشت الکترولیت می‌شود و در عین حال رنگیزه‌های فتوسنتزی، اسمولیت‌ها، شاخص پایداری غشاء و آنزیم‌های پاداکسیدانی را افزایش می‌دهد (Zaki et al., 2024). باناکار و همکاران (Banakar et al., 2021) گزارش کردند که افزایش شوری تا سطح شش دسی‌زیمنس بر متر بر درصد جوانه‌زنی بذور شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) تأثیری نداشت، امّا با اعمال سطوح شوری بالاتر، درصد جوانه‌زنی به‌تدریج کاهش یافت و اعمال ۲۴ و ۲۷ دسی‌زیمنس، درصد جوانه‌زنی بذور را ۲۹/۸ و ۸۰/۸۱ درصد کاهش داد. لذا با توجه به گسترش روزافزون شوری آب و خاک و اثرات محدودکننده آن بر رشدونمو و تولید باقلا، هدف از این پژوهش بررسی اثرات پتاسیم سیلیکات بر بهبود خصوصیات جوانه‌زنی، شاخص‌های رشدی و تعیین آستانه تحمل بذر باقلا در برابر تنش شوری بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در بهار سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه دانشگاه ایلام اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام گرفت. عامل‌های آزمایش شامل پتاسیم سیلیکات در چهار سطح (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات) و پنج سطح تنش شوری شامل (۰، ۱، ۴، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) بودند.

برای اجرای این آزمایش از بذر باقلا ضدعفونی‌شده رقم لوزدی اتونو محصول شرکت فیتو اسپانیا استفاده گردید. برای انجام پرایمینگ، بذرهای باقلا به‌مدت ۱۰ ساعت درون پتاسیم سیلیکات با غلظت‌های مختلف براساس نوع تیمارها قرار گرفته و سپس در دمای اتاق خشک شدند، همچنین برای غلظت صفر میلی‌گرم پتاسیم سیلیکات، بذرها در آب مقطر بدون افزودن پتاسیم سیلیکات به‌مدت ۱۰ ساعت نگهداری شدند.

برای اعمال تنش شوری با غلظت‌های مورد نظر، از نمک سدیم کلرید (NaCl) با جرم مولی ۵۸/۴۴ گرم بر مول مطابق معادله‌های ۱ و ۲ استفاده شد (Meot-Duros & Magne, 2008).

معادله (۱) هدایت الکتریکی کمتر از هفت دسی‌زیمنس بر متر	$TDS\ (mg.L^{-1}) = EC\ (dS.m^{-1}) \times 640$
معادله (۲) هدایت الکتریکی بیشتر از هفت دسی‌زیمنس بر متر	$TDS\ (mg.L^{-1}) = EC\ (dS.m^{-1}) \times 800$

برای انجام این آزمایش، تعداد ۸۰ پتری پلاستیکی با قطر ۱۰ سانتی‌متر تهیه شد. در هر پتری، ۱۰ عدد بذر باقلا روی کاغذ صافی قرار گرفت. محلول‌های نمک سدیم کلرید با غلظت‌های مشخص به‌میزان ۱۰ میلی‌لیتر به هر پتری مطابق تیمارها اضافه شد. سپس درب هر پتری بسته و برای جوانه‌زنی در ژرمیناتور با دمای ۲۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند (Anaya et al., 2018). برای شاهد از آب مقطر استفاده گردید. پتری‌ها به‌صورت روزانه بازبینی و بذور جوانه‌زده در ساعتی معین شمارش شدند. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه حداقل دو میلی‌متر بود. شمارش تا زمانی ادامه یافت که افزایشی در تعداد بذور جوانه‌زده مشاهده نشد و این حالت به‌مدت سه روز متوالی ثابت ماند. در پایان روز بیستم به‌منظور تعیین شاخص‌های رشد، ریشه و اندام هوایی گیاهچه را جدا کرده و طول آن‌ها توسط خط‌کش بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه و اندام هوایی، نمونه‌ها را در پاکت‌های جداگانه گذاشته و به‌مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و سپس با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد.

برای محاسبه درصد جوانه‌زنی از معادله ۳ استفاده شد (Ellis & Roberts, 1981).

$$GP=\left(\frac{Ni}{N}\right)\times 100 \qquad \text{(۳) معادله}$$

که در آن، GP: درصد جوانه‌زنی، Ni: تعداد کل بذرهای جوانه‌زده در روز آخر شمارش و N: تعداد کل بذرها است.

سرعت جوانه‌زنی با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد که در آن، Rs: سرعت جوانه‌زنی (تعداد بذر در روز)، Si: تعداد بذر جوانه‌زده در هر شمارش و Di: تعداد روز تا شمارش nام بود (Maguire, 1962).

$$Rs=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{D_i} \qquad \text{(۴) معادله}$$

برای محاسبه متوسط جوانه‌زنی از معادله ۵ استفاده شد (Ellis & Roberts, 1981).

$$MGT=\sum(n\times d)/N \qquad \text{(۵) معادله}$$

که در آن، MGT: متوسط زمان جوانه‌زنی، n: تعداد روزها از شروع جوانه‌زنی، d: تعداد بذور جوانه‌زده در هر روز و N: تعداد کل بذور جوانه‌زده است.

برای محاسبه شاخص بنیه از معادله ۶ استفاده شد (ISTA, 2010).

$$VI= GP\ (\%) \times (SL\ (cm)+RL\ (cm)) \qquad \text{(۶) معادله}$$

که در آن، VI: شاخص بنیه، GP: درصد جوانه‌زنی، SL: طول گیاهچه و RL: طول ریشه‌چه بر حسب سانتی‌متر هستند.

در تحقیقات تحمل به تنش شوری، مدل‌های مختلف تجربی به‌منظور ارزیابی پاسخ گیاهان به شوری استفاده می‌شود. به‌منظور محاسبه آستانه تحمل صفات مورد ارزیابی به تنش

شوری از مدل ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) استفاده گردید.

معادله (۷)
$$Y= 100 - l\,(EC-a_0)$$

که در آن، Y: عملکرد نسبی (درصد جوانه‌زنی)، l: شیب مدل و a_0: آستانه‌ای از شوری است که در بیشتر از آن مقدار، Y شروع به کاهش می‌کند. زمانی‌که شوری (EC) بین صفر و حد آستانه (a_0) باشد، عملکرد نسبی یا جوانه‌زنی نسبی (Y) مساوی ۱۰۰ درصد بوده و هیچ‌گونه کاهش عملکردی مشاهده نمی‌شود، امّا در شوری‌های بالاتر از حد آستانه (a_0)، عملکرد نسبی یا جوانه‌زنی نسبی با شیب ثابتی (l) به‌صورت خطی شروع به کاهش می‌نماید.

ون‌گنوختن و هافمن (Van Genuchten & Hoffman, 1984) مدل سه پارامتری لجستیک (معادله ۸) برای کاهش درصد جوانه‌زنی بذر تحت پتانسیل‌های مختلف شوری را ارائه دادند. این محققان گزارش کردند که واکنش گیاهان به شوری همیشه به‌صورت خطی نیست، بلکه به‌صورت سیگموئیدی است. مطابق این مدل، مقدار جولنه‌زنی نسبی از ابتدا با افزایش هر سطح شوری به‌صورت غیرخطی شروع به کاهش کرده و در نقطه EC50، مقدار آن به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

معادله (۸)
$$Y= \frac{Y_{max}}{\left(1+\left(\frac{EC}{EC_{50}}\right)^{E_{rate}}\right)}$$

که در آن، Y: درصد جوانه‌زنی در سطح شوری، Y_{max}: حداکثر درصد جوانه‌زنی، EC_{50}: سطح شوری لازم جهت ۵۰ درصد بازدارندگی حداکثر درصد جوانه‌زنی و E_{rate}: نشانگر شیب مدل و همیشه بالاتر از یک می‌باشد.

برای کمّی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذر باقلا در سطوح مختلف پرایمینگ به تنش شوری، از مدل نمایی کاهشی (معادله ۹) استفاده شد.

معادله (۹)
$$Y=Y_{max}\times \exp^{(-E_{rate}\times EC)}$$

که در آن، Y: نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی بذر باقلا در سطوح مختلف شوری EC، Y_{max}: حداکثر درصد جوانه‌زنی و E_{rate}: نشانگر شیب مدل است.

همچنین داده‌های مربوط به درصد جوانه‌زنی بذر باقلا در سطوح مختلف پرایمینگ به تنش شوری با یک مدل سیگموئیدی کاهشی (معادله ۱۰) برازش داده شدند (Chauhan & Johnson, 2008).

معادله (۱۰)
$$Y=\frac{Y_{max}}{1+\left(\exp^{\left(\frac{EC-EC_{50}}{E_{rate}}\right)}\right)}$$

که در آن، Y: نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی بذر باقلا در سطوح مختلف شوری EC، Y_{max}: حداکثر درصد جوانه‌زنی، EC_{50}: نشان‌دهنده سطح شوری است که باعث کاهش ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذور می‌گردد و E_{rate}: شیب مدل را نشان می‌دهد.

علاوه‌بر این از تابع گامپرتز نیز برای نشان دادن درصد جوانه‌زنی بذر باقلا در سطوح مختلف شوری استفاده شد.

معادله (۱۱)
$$Y= Y_{max}\times \exp\left(-\exp\left(-\frac{(EC-EC_0)}{E_{rate}}\right)\right)$$

که در آن، Y: نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی، EC: نشانگر سطوح شوری، Y_{max}: بیانگر مجلنب بالای منحنی یا همان حداکثر مقدار درصد جوانه‌زنی، E_{rate}: شیب منحنی یا آهنگ تغییر درصد جوانه‌زنی به‌ازای هر سطح شوری و EC_0: سطحی از شوری است که در آن شیب منحنی خطی می‌شود.

ارزیابی مدل (همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده) به‌وسیله شاخص میانگین مربعات ریشه خطا RMSE، ضریب تبیین R^2 Adj، شاخص آکائیک (AIC[1]) و شاخص آکائیک تصحیح‌شده[2] AICc انجام شد (Anderson & Burnham, 2002). هر چه میزان عددی RMSE کوچک‌تر باشد، بیانگر این مطلب است که مدل برازش مناسبی دارد. اگر RMSE کمتر و R^2 Adj نزدیک‌تر به یک باشد، معرف برازش بهترین معادله است. مدلی با میزان AIC کمتر به‌عنوان مدل بهتر انتخاب می‌شود.

معادله (۱۲)
$$AIC = n \times \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2 \times K$$

معادله (۱۳)
$$AICc = n \times \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2 \times K + \frac{2\times k\times(K+1)}{n-K-1}$$

که در آن‌ها، RSS: مجموع مربعات باقی‌مانده رگرسیون، K: شمار پارامترهای برآوردشده در مدل و n: شمار نقطه‌ها یا نمونه‌ها می‌باشد. اگر اختلاف شاخص آکائیک تصحیح‌شده دو مدل ۲ و یا کمتر از آن باشد، اختلاف معنی‌داری ندارد. بهترین مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان AICc محاسبه‌شده را دارد.

تجزیه آماری داده‌ها جهت بررسی اثرات پرایمینگ و تنش شوری بر شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه باقلا با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. متغیرهای وابسته، شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه (درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر، طول و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه) و متغیرهای مستقل شامل تنش شوری و پتاسیم سیلیکات بودند. نرمال بودن داده‌ها، با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

1- Akaike information criterion

2- Corrected Akaike information criterion

مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه مقایسه میانگین از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. برازش مدل‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی و با نرم‌افزار Sigmaplot 14 و رسم نمودارها به‌وسیله نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات تنش شوری، پتاسیم سیلیکات و اثرات متقابل آن‌ها (تنش شوری × پتاسیم سیلیکات) بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر باقلا معنی‌دار است. همچنین متوسط زمان جوانه‌زنی تحت اثرات تنش شوری و پتاسیم سیلیکات در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۱).

کاربرد پتاسیم سیلیکات تحت شرایط عدم تنش شوری (شوری ۰ و ۱ دسی‌زیمنس بر متر) اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی بذرهای باقلا نداشت، امّا درصد جوانه‌زنی با کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم پتاسیم سیلیکات در لیتر تحت شرایط تنش شوری ۴، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب ۲۰/۷، ۲۳/۸ و ۲۶/۷ درصد در مقایسه با عدم کاربرد پتاسیم سیلیکات افزایش یافت (شکل ۱).

تنش شوری باعث کاهش درصد جوانه‌زنی بذرهای باقلا شد، این نتایج با نتایج آنایا و همکاران (Anaya et al., 2018)، عمر و همکاران (Omar et al., 2024) مبنی بر کاهش درصد جوانه‌زنی بذرهای باقلا تحت شرایط تنش شوری مطابقت دارد. آنایا و همکاران (Anaya et al., 2018) گزارش کردند که درصد جوانه‌زنی بذر باقلا تحت شرایط عدم تنش شوری ۸۰ درصد و در شوری‌های ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار نمک به‌ترتیب ۷۰، ۶۲، ۵۰ و ۴۵ درصد بود. همچنین این پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد اسید سالیسیلیک باعث بهبود جوانه‌زنی باقلا تحت شرایط تنش شوری می‌شود (Anaya et al., 2018). کاهش درصد جوانه‌زنی در ارقام باقلا Sakha-3 و Giza-716 تحت تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار نمک نیز گزارش شده است (Omar et al., 2024). این محققان، تنش اسمزی ناشی از سمیت یون‌ها با کاهش جذب آب در مرحله آبنوشی و در نتیجه کاهش درصد جوانه‌زنی را گزارش کردند (Omar et al., 2024). تنش شوری سبب رسوب نمک در بخش سطحی خاک شده و در نتیجه باعث کاهش جوانه‌زنی می‌شود. علاوه‌بر این، استقرار گیاه به‌طور منفی تحت تأثیر کاهش پتانسیل آب خاک قرار گرفته و سبب می‌شود که گیاه در جذب آب و عناصر غذایی با مشکل برخورد کند، و در نهایت تنش شوری باعث تنش اکسیداتیو، سمیت سلولی و عدم تعادل یونی در سلول‌های گیاهی خواهد شد (Kukric et al., 2023). علاوه‌بر این، یون‌های کلر و سدیم اضافی جذب‌شده با جذب آب می‌تواند باعث سمیت یونی شده و بر فرآیندهای متابولیک در بذرهای جوانه‌زده از طریق فعالیت آنزیمی مانند تنفس، هیدرولیز عناصر غذایی و تولید انرژی تأثیر منفی بگذارد (Naseer et al., 2022). شوری بر رشدونمو گیاهان از جنبه‌های مختلف به‌عنوان یکی از عوامل تنش‌های محیطی مؤثر تأثیر می‌گذارد. تنش شوری جذب آب را محدود، از رشد محور جنینی جلوگیری کرده و منجر به خواب ثانویه بذر می‌شود (Farooq et al., 2017b). جذب آب کمتر باعث فعال شدن ضعیف آنزیم‌های هیدرولیتیک شده که منجر به کاهش جوانه‌زنی بذر تحت تنش شوری می‌شود (Nirmala et al., 2016).

سرعت جوانه‌زنی

سرعت جوانه‌زنی بذرهای باقلا تحت شرایط عدم تنش شوری تحت تأثیر پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات قرار نگرفتند. تحت شرایط شوری چهار دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم پتاسیم سیلیکات بر لیتر باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی بذرهای باقلا به‌میزان ۲۴/۱ و ۲۰/۶ درصد در مقایسه با عدم کاربرد پتاسیم سیلیکات شدند. سرعت جوانه‌زنی بذرهای باقلا با کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم پتاسیم سیلیکات در لیتر تحت شرایط تنش شوری ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به‌میزان ۲۳/۹ و ۲۶/۷ درصد بیشتر از عدم کاربرد آن بود (جدول ۲).

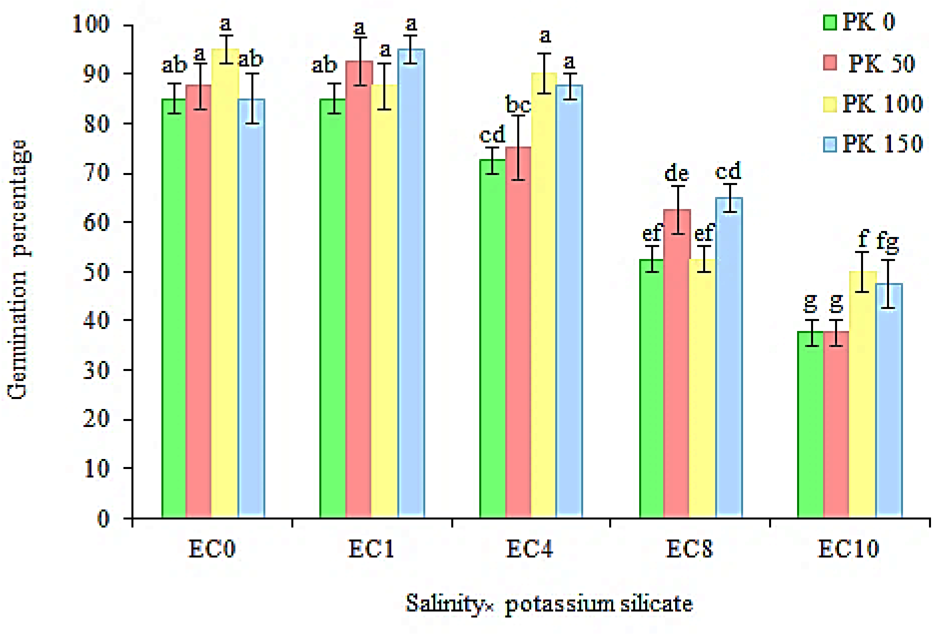
جدول ۱- جدول تجزیه واریانس اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر باقلا تحت شرایط تنش شوری

Table 1- Analysis of variance for the effects of pretreatment with potassium silicate on faba bean seed germination indices under salinity stress conditions

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	شاخص بنیه بذر Vigor index
تنش شوری Salinity	4	6783.1**	0.5594**	12.946**	143.185**
پتاسیم سیلیکات Potassium silicate	3	374.6**	0.0309**	0.183ns	2.312**
تنش شوری× پتاسیم سیلیکات Salinity× potassium silicate	12	113.1*	0.0093*	1.171**	2.949**
خطای آزمایش Error	60	58.8	0.0048	0.142	0. 532
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	10.63	10.62	7.44	16.10

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد، ns: غیرمعنی‌دار

*, and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively, ns: non significant



شکل ۱- اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات بر درصد جوانه‌زنی بذر باقلا تحت شرایط تنش شوری

Fig. 1- Effects of pretreatment with potassium silicate on the germination percentage of faba bean seeds under salinity stress conditions

جدول ۲- اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه باقلا تحت شرایط تنش شوری

Table 2- Effects of pretreatment with potassium silicate on germination and growth indices of faba bean seedlings under salinity stress conditions

تنش شوری (دسی‌زیمنس بر متر) Salinity ($dS.m^{-1}$)	پتاسیم سیلیکات (میلی‌گرم در لیتر) Potassium silicate ($mg.l^{-1}$)	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Germination rate ($seed.day^{-1}$)	متوسط زمان جوانه‌زنی (روز) Mean germination time (day)	طول ساقه‌چه (سانتی‌متر) Shoot length (cm)	وزن خشک ساقه‌چه (گرم در بوته) Shoot dry weight ($g.plant^{-1}$)	وزن خشک ریشه‌چه (گرم در بوته) Root dry weight ($g.plant^{-1}$)
0	0	0.773^{ab*}	4.28^{fgh}	4.55^{abc}	0.382^{abc}	0.376^{b}
	50	0.795^{a}	3.93^{h}	4.63^{ab}	0.406^{ab}	0.393^{ab}
	100	0.864^{a}	3.88^{h}	5.03^{a}	0.414^{a}	0.419^{a}
	150	0.773^{ab}	3.98^{gh}	4.50^{abc}	0.366^{cd}	0.363^{bc}
1	0	0.773^{ab}	4.63^{ef}	3.98^{cd}	0.321^{e}	0.315^{d}
	50	0.841^{a}	4.53^{ef}	4.43^{bcd}	0.347^{de}	0.336^{cd}
	100	0.795^{a}	4.53^{ef}	3.85^{de}	0.312^{e}	0.315^{d}
	150	0.864^{a}	4.35^{fgh}	4.73^{ab}	0.376^{bcd}	0.368^{bc}
4	0	0.659^{cd}	4.60^{ef}	2.78^{f}	0.178^{gh}	0.188^{fg}
	50	0.682^{cb}	4.48^{efg}	2.83^{f}	0.188^{gh}	0.176^{g}
	100	0.818^{a}	5.38^{bcd}	3.35^{ef}	0.246^{f}	0.242^{e}
	150	0.795^{a}	4.90^{de}	3.25^{f}	0.209^{g}	0.218^{ef}
8	0	0.478^{ef}	6.75^{a}	1.70^{gh}	0.125^{ij}	0.110^{ij}
	50	0.568^{ed}	6.85^{a}	2.88^{f}	0.156^{hi}	0.164^{gh}
	100	0.478^{ef}	5.63^{b}	1.75^{gh}	0.132^{ij}	0.133^{hi}
	150	0.591^{cd}	5.68^{b}	2.95^{f}	0.172^{h}	0.180^{g}
10	0	0.341^{g}	5.48^{bc}	1.18^{h}	0.070^{k}	0.073^{k}
	50	0.341^{g}	5.00^{cde}	1.18^{h}	0.073^{k}	0.077^{jk}
	100	0.455^{f}	5.60^{b}	1.80^{g}	0.131^{ij}	0.117^{i}
	150	0.432^{fg}	6.78^{a}	1.70^{gh}	0.117^{j}	0.120^{il}

* در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

* Means followed by the same letters are not significantly different according to Least Significant Difference (LSD) test ($p<0.05$).

براساس نتایج این پژوهش، هر چند تنش شوری سبب کاهش سرعت جوانه‌زنی بذور باقلا شد، امّا پیش‌تیمار بذور با پتاسیم سیلیکات تا حدودی از کاهش سرعت جوانه‌زنی ممانعت کرده است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2010) بیان کردند که اعمال سیلیکون باعث افزایش سرعت و درصد جوانه‌زنی گیاه *Momordica charantia* L. در سطوح مختلف تنش شوری شد. افزایش غلظت شوری در محیط‌های جوانه‌زنی اغلب باعث تأخیر در شروع جوانه‌زنی می‌شود (Abayechaw & Wulchafo, 2020). این بدان معنی است که سطوح بالای نمک طعام نه‌تنها درصد جوانه‌زنی را کاهش داده، بلکه جوانه‌زنی بذر را نیز به تأخیر می‌اندازد. بکیت و همکاران (Bekhiet et al., 2022) کاهش سرعت جوانه‌زنی باقلا را در غلظت‌های بالای نمک (۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. شارما و همکاران (Sharma et al., 2014) گزارش کردند چنانچه جذب آب توسط بذر مختل شود و یا جذب آب به‌کندی صورت گیرد، فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی در درون بذر به‌کندی انجام می‌گیرد و در نتیجه مدت زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و سرعت جوانه‌زنی کاهش می‌یابد. ابراهیم (Ibrahim, 2016) گزارش نمود که در سطوح شوری نه‌چندان زیاد، القاء حالتی شبیه به خواب بذر، باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌شود.

مدت زمان جوانه‌زنی

متوسط زمان جوانه‌زنی با اعمال تنش شوری افزایش یافت. تحت شرایط تنش شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد مقادیر ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات باعث کاهش مدت زمان جوانه‌زنی بذرهای باقلا شد، امّا تحت شرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات باعث افزایش مدت زمان جوانه‌زنی بذرهای باقلا به‌میزان ۲۴/۲ درصد شد (جدول ۲). تحت تنش شوری متوسط، زمان جوانه‌زنی افزایش یافت، بیشتر بودن میزان این صفت یعنی اینکه بذرها در مدت زمان بیشتری جوانه زدند. متوسط زمان جوانه‌زنی بذر ویژگی بسیار مهمی در استقرار گیاهچه و استفاده مطلوب از شرایط محیطی است. به‌طور کلی، تنش شوری به‌وسیله افزایش فشار اسمزی و یا اثرات سمیت یونی باعث کاهش جذب آب و تحت تأثیر قرار گرفتن فرآیندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی شده، لذا منجر به کاهش طول و وزن گیاهچه و تأخیر در جولنه‌زنی و به‌دنبال آن کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر می‌شود (Keshtiban et al., 2014). نتایج نشان داد که زمان جوانه‌زنی بذر باقلا تحت تنش شوری متوسط افزایش یافت که با نتایج سعادت و همکاران (Saadat et al., 2023) روی لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) مطابقت دارد.

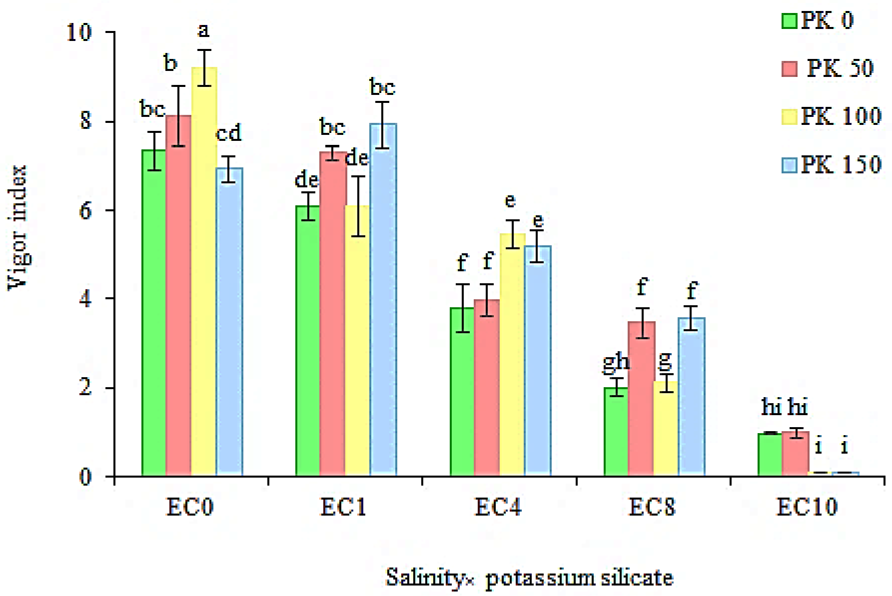
شاخص بنیه بذر

کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات تحت شرایط عدم تنش شوری، شاخص بنیه بذر باقلا را ۲۵/۴ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن افزایش داد. شاخص بنیه بذر باقلا تحت شرایط تنش شوری یک دسی‌زیمنس بر متر با کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم پتاسیم سیلیکات در لیتر ۳۰/۱ درصد افزایش یافت. کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات تحت شرایط تنش شوری چهار دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش شاخص بنیه بذر به‌ترتیب به‌میزان ۳۷/۹ و ۴۴/۴ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن شد. کاربرد ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات تحت شرایط تنش شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر باعث بهبود شاخص بنیه بذر باقلا به‌ترتیب به‌میزان ۷۳/۷ و ۷۹/۰ درصد گردید (شکل ۲).

شاخص بنیه گیاهچه یکی از مهم‌ترین خصوصیاتی است که افزایش مقدار آن نشان‌دهنده بهبود کیفیت و قدرت جوانه‌زنی بذر است. در این پژوهش، پتاسیم سیلیکات با بهبود شاخص‌های رشد گیاهچه و درصد جوانه‌زنی سبب افزایش شاخص بنیه گیاهچه باقلا گردید. تنش شوری با کاهش درصد جوانه‌زنی و شاخص‌های رشد گیاهچه باعث کاهش کیفیت بذر و شاخص بنیه گیاهچه باقلا شد. افزایش سطوح تنش شوری از طریق کاهش مقدار رطوبت بافت گیاهچه، در اثر کاهش فشار آماس و تجمع ماده خشک در بافت‌های ذخیره‌ای ریشه و ایجاد فعالیت‌های غیرطبیعی در اثر سمیت یون‌های سدیم و کلر و ایجاد پتانسیل اسمزی منفی در گیاهچه باعث کاهش بینه بذر می‌گردد (Sharma et al., 2004). همچنین، کاهش شاخص‌های بنیه تحت تنش شوری ممکن است به‌دلیل کاهش تقسیم سلولی و افزایش تنفس باشد (Tao et al., 2018). کاهش شاخص بنیه بذر ماش نیز تحت تنش شوری گزارش شده است که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Nirmala et al., 2016).

طول ساقه‌چه

طول ساقه‌چه باقلا تحت اثرات تنش شوری و کاربرد پتاسیم سیلیکات و اثرات متقابل (تنش شوری × پتاسیم سیلیکات) در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). طول ساقه‌چه باقلا در شرایط عدم تنش شوری تحت اثرات کاربرد پتاسیم سیلیکات قرار نگرفت، امّا کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات در سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر باعث بهبود طول ساقه‌چه باقلا به‌میزان ۵۳/۲ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن شد (جدول ۲). تنش شوری باعث کاهش طول ساقه‌چه بذرهای باقلا گردید، زیرا تنش شوری دارای اثر بازدارنده بر ظهور بافت‌های جنین است (Gao et al., 2015). این نتایج با مطالعات احمد و ستار (Ahmed & Sattar, 2024) مطابقت دارد. احمد و ستار (Ahmed & Sattar, 2024) گزارش کردند که طول ساقه‌چه باقلا از ۲۵/۵ سانتی‌متر تحت شرایط عدم تنش شوری تا ۲۱/۳ سانتی‌متر در شرایط شوری ۱۰۰ میلی‌مولار متغیر است. بسیاری از پژوهشگران، دلیل کاهش رشد گیاهچه در شرایط تنش شوری را جلوگیری از انتقال مواد غذایی از لپه به جنین گزارش نموده‌اند. علاوه‌بر این، با افزایش شوری محلول اطراف بذر، جذب آب توسط بذر دچار اختلال شده، ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها کمتر شده و در نتیجه رشد گیاهچه کاهش می‌یابد (Basra et al., 2005). بنابراین، پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات با تحریک بسیاری از فرآیندهای متابولیک در مراحل اولیه جولنه‌زنی سبب افزایش طول ساقه‌چه باقلا تحت شرایط تنش شوری شده است.



شکل ۲- اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات بر شاخص بنیه بذر باقلا تحت شرایط تنش شوری

Fig. 2- Effects of pretreatment with potassium silicate on the vigor index of faba bean seeds under salinity stress conditions

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات بر شاخص‌های رشد گیاهچه باقلا تحت شرایط تنش شوری

Table 3- Analysis of variance of effects of pretreatment with potassium silicate on faba bean seedling growth indices under salinity stress conditions

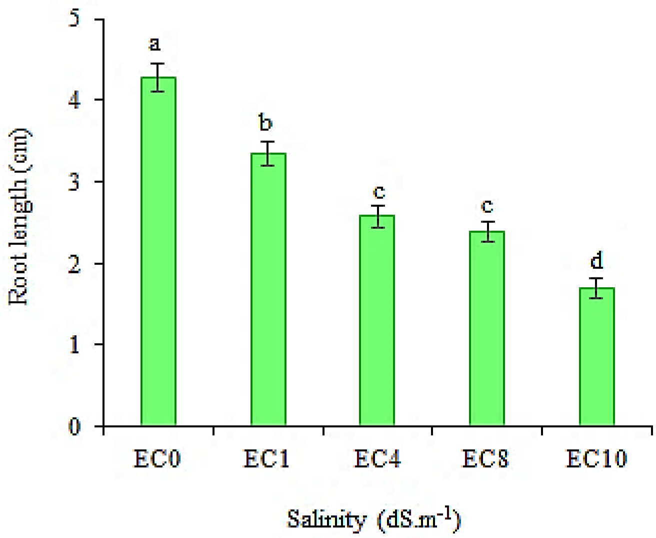
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		طول ساقه‌چه Shoot length	طول ریشه‌چه Root length	وزن خشک ساقه‌چه Shoot dry weight	وزن خشک ریشه‌چه Root dry weight
تنش شوری Salinity	4	28.282**	15.416**	0.2522**	0.2429**
پتاسیم سیلیکات Potassium silicate	3	1.174**	0.402ns	0.0046**	0.0057**
تنش شوری× پتاسیم سیلیکات Salinity× potassium silicate	12	0.596**	0.391ns	0.0024**	0.0022**
خطای آزمایش Error	60	0.171	0.304	0.0006	0.0007
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	13.13	19.32	10.40	11.15

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد؛ ns: غیرمعنی‌دار

* and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively; ns: non significant

طول ریشه‌چه

طول ریشه‌چه باقلا فقط تحت تأثیر کاربرد پتاسیم سیلیکات در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با اعمال تنش شوری در سطوح ۱، ۴، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، طول ریشه‌چه باقلا به‌ترتیب ۲۱/۸، ۳۹/۷، ۴۴/۲ و ۶۰/۰ درصد در مقایسه با عدم تنش شوری کاهش یافت (شکل ۳).



شکل ۳- طول ریشه‌چه باقلا تحت شرایط تنش شوری

Fig. 3- Root length of faba bean seeds under salinity stress conditions

ریشه بیشتر از سایر اندام‌ها به‌علت ارتباط مستقیم با خاک و آب در معرض تنش شوری قرار دارد و به‌عنوان یک فیلتر، عبور یون‌ها را کنترل کرده و نسبت بهینه یون‌های پتاسیم و سدیم را برای فعالیت‌های سلول فراهم می‌سازد (Bavarsadi et al., 2017). تحت شرایط سطوح بالای نمک، کاهش پتانسیل آب و یا افزایش مقدار املاح مضر در محیط رشد گیاه سبب کاهش طول ریشه‌چه می‌شود. در چنین وضعیتی، بخش اساسی انرژی ریشه صرف جذب فعال عناصر غذایی مورد نیاز شده و در نتیجه انرژی اختصاص‌یافته به رشد ریشه کاهش می‌یابد. کاهش طول ریشه باقلا تحت شرایط تنش شوری در سایر مطالعات نیز گزارش شده است که نشان‌دهنده حساسیت باقلا به تنش شوری است (Hafez et al., 2021; Ahmed & Sattar, 2024). احمد و ستار (Ahmed & Sattar, 2024) گزارش کردند که طول ریشه‌چه باقلا تحت شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار نمک ۴۱/۹ درصد کاهش می‌یابد. حافظ و همکاران (Hafez et al., 2021) نشان دادند که کاربرد پتاسیم سیلیکات اثر مثبتی بر شاخص‌های رشد ریشه باقلا (طول ریشه، وزن خشک ریشه و تعداد گره) تحت شرایط تنش شوری دارد. اثرات مثبت پتاسیم سیلیکات را می‌توان به نقش تقویت‌کننده پتاسیم و سیلیکات در سیستم‌های نقل‌وانتقال سلولی که علاوه‌بر بهبود نفوذپذیری آب و حفظ آب، عناصر غذایی و آب را نیز منتقل می‌کنند، نسبت داد (Rawat et al., 2016). اعتصامی و همکاران (Etesami & Adl, 2020) گزارش کردند که کاربرد سیلیکون باعث کاهش جذب سدیم، ممانعت از رسوب سدیم در ریشه‌های تحت تنش شوری و افزایش جذب پتاسیم می‌شود.

وزن خشک ساقه‌چه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثرات تنش شوری، پتاسیم سیلیکات و اثرات متقابل آن‌ها (تنش شوری × پتاسیم سیلیکات) در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک ساقه‌چه باقلا هستند (جدول ۳). بیشترین وزن خشک ساقه‌چه (۰/۴۱۴ گرم در بوته) با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات تحت شرایط عدم تنش شوری مشاهده شد که در مقایسه با عدم کاربرد آن ۸/۵ درصد بیشتر بود. تحت شرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات باعث بهبود وزن خشک ساقه‌چه باقلا به‌میزان ۸۶/۵ و ۶۶/۵ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن شد (جدول ۲).

آنایا و همکاران (Anaya et al., 2018) نتایج مشابهی را گزارش کردند. توکلی و همکاران (Tavakkoli et al., 2024) کاهش ماده خشک دو رقم باقلا (ارقام Fiesta و Cairo) را تحت تنش شوری ۸/۵ و ۱۵/۸ دسی‌زیمنس بر متر نیز گزارش کردند. احمد و ستار (Ahmed & Sattar, 2024) کاهش وزن خشک ساقه‌چه باقلا تحت شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار نمک را به‌میزان ۴۵/۴ درصد نشان دادند. احتمالاً کاهش وزن خشک ساقه‌چه باقلا تحت شرایط تنش شوری ناشی از کاهش سنتز و فعالیت آنزیم‌های مورد نیاز در رشدونمو بذر است، زیرا شوری زیاد، سنتز و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ذخایر بذر را محدود می‌کند، و در نتیجه وزن خشک ساقه‌چه را کاهش می‌دهد (Kaur et al., 2022). پتاسیم سیلیکات با افزایش مقدار

سیلیکون، لیگنین و سلولز در ساقه‌ها باعث افزایش ماده خشک در گیاه می‌شود (Gong et al., 2021).

وزن خشک ریشه‌چه

نتایج مندرج در جدول ۳ نشــان داد که اثرات تنش شــوری، پتاسیم سیلیکات و اثرات متقابل آن‌ها (تنش شوری × پتاسیم سیلیکات) در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک ریشه‌چه باقلا معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشــترین وزن خشــک ریشــه‌چه (۰/۴۱۹ گرم در بوته) با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاســیم سـیلیکات تحت شـرایط عدم تنش شـوری مشـاهده شـد که در مقایسه با عدم کاربرد آن ۱۱/۵ درصد بیشتر بود. کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاســیم ســیلیکات تحت شــرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر باعث بهبود وزن خشک ریشه‌چه باقلا به‌میزان ۶۰/۱ و ۶۵/۶ درصـد در مقایسـه با عدم کاربرد آن شد (جدول ۲).

وزن خشک ریشـه‌چه باقلا تحت تنش شوری کاهش یافت. احمد و سـتار (Ahmed & Sattar, 2024) نتایج مشـابهی مبنی بر کاهش وزن خشک ریشـه‌چه باقلا به‌میزان ۵۷/۱ درصد تحت شـرایط تنش شـوری ۱۰۰ میلی‌مولار نمک گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. لاتف و همکاران (Latef et al., 2021) گزارش کردند که وزن تر ریشـه، وزن خشک ریشـه، وزن تر ساقه و وزن خشـک ساقه تحت تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نمـک به‌ترتیب به‌میزان ۴۸/۷، ۷۰/۴، ۵۹/۷ و ۴۲/۱ درصـــد کاهش یافت. کاهش وزن خشــک ریشــه‌چه تحت تنش شــوری به‌علت کاهش تقسیم سلولی و رشد، از بین رفتن تعادل یونی و اسـمزی اسـت. ریشــه اولین اندامی اسـت که نقش جذب آب و عناصـر غذایی را به عهده دارد و تنش شــوری بیشــتر از بخش ریشـه به گیاه وارد می‌شـود، لذا ریشـه اولین بخشـی اسـت که با تنش شـوری روبه‌رو می‌شـود. نیتندو و همکاران (Netondo et al., 2004) گزارش کردند که رســوب نمک در ریشـــه در حال رشد علت اصلی کم‌آبی فیزیولوژیکی و در نهایت کاهش تقسیم سلولی، کاهش رشـد ریشـه و شـاخص بنیه بذر اسـت. پیش‌تیمار با پتاسـیم سـیلیکات باعث بهبود وزن ریشـه در سـطوح مختلف تنش شوری شـد که این امر به‌علت نقش سـیلیسـیم در افزایش آسیمیلاسیون گیاهی و پتاسیم در سرعت بخشـیدن به سـنتز و نقل و انتقال کربوهیدرات است که در نهایت سبب افزایش ماده خشــک گیاه می‌شــود. پتاســیم ســیلیکات با رســوب در دیواره ســـلولی و افزایش ضـــخامت دیواره ســـلولی باعث افزایش وزن ریشه‌چه می‌شود. کائوی و همکاران (Kuai et al., 2017) گزارش دادند که کاربرد ســـیلیس باعث افزایش قطر ریشـــه و مقدار لیگنینی در مراحل اولیه جوانـه‌زنی در گیـاه کلزا (*Brassica napus* L.) می‌شود.

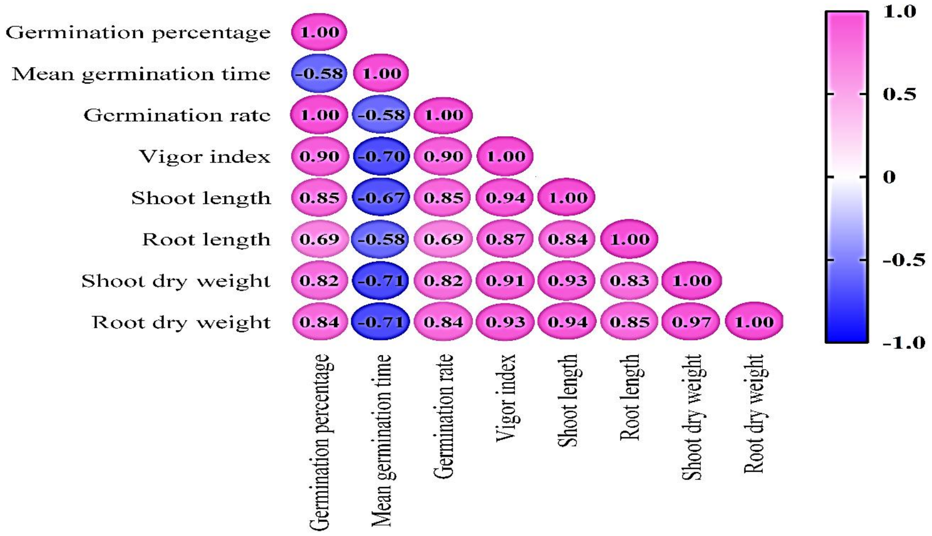
همبستگی صفات

بین شـاخص‌های جوانه‌زنی (شـامل درصـد جوانه‌زنی، سـرعت جوانه‌زنی و شــاخص بنیه بذر) با شــاخص‌های رشــد گیاهچه (شــامل طول ســاقه‌چه و ریشــه‌چه و وزن خشــک ســاقه‌چه و ریشـه‌چه) همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد، امّا مدت زمان جوانه‌زنی با این صـــفات همبســـتگی منفی و معنی‌داری داشت (شکل ۴).

اثرات پیش‌تیمار بر آسـتانه تحمل به تنش شـوری باقلا در مرحله جوانه‌زنی با استفاده از مدل‌های مختلف تجربی

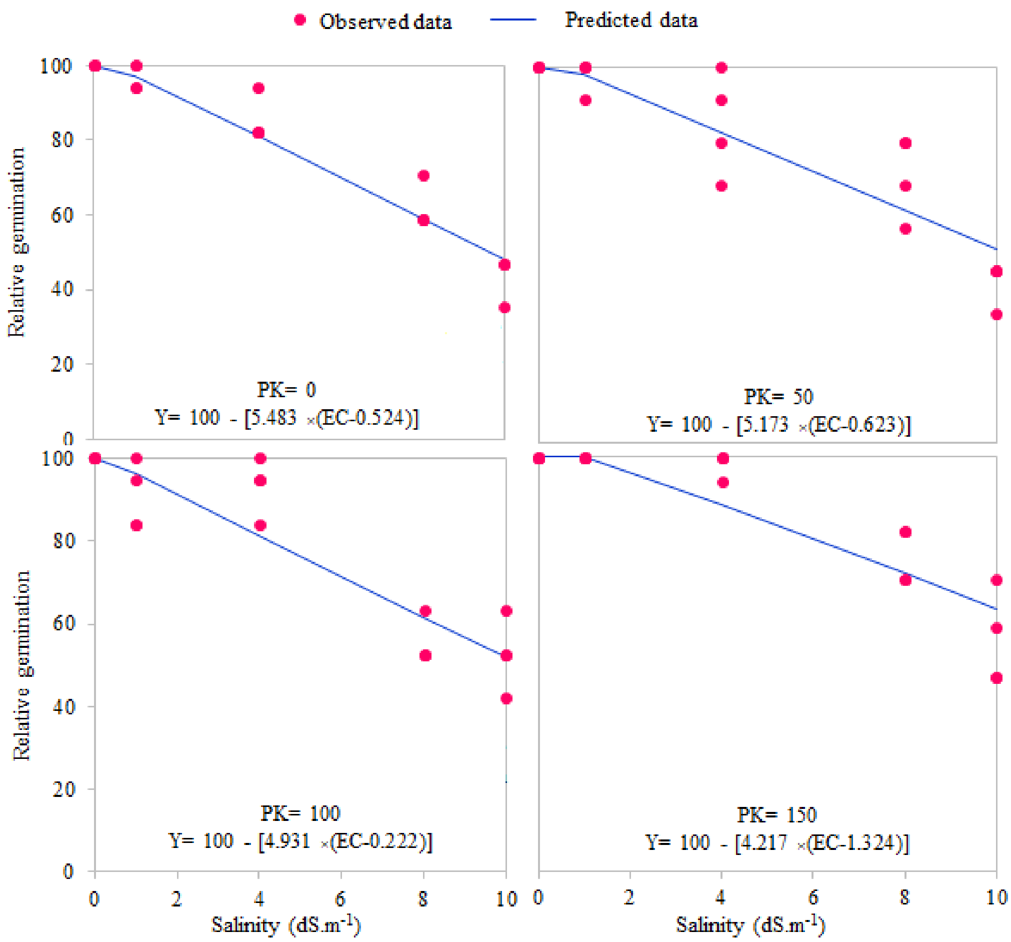
براســاس معادله ماس و هافمن، حد آســتلنه تحمل به تنش شـوری در باقلا براسـاس جوانه‌زنی نسبی با عدم کاربرد پتاسیم سیلیکات ۰/۵۲ و شیب کاهش آن ۵/۴۸ بود. حد آستانه تحمل به تنش شـوری در باقلا با کاربرد ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات به‌ترتیب ۰/۶۲، ۰/۲۲ و ۱/۳۲ بود و شیب کاهش آن نیز ۵/۱۷، ۴/۹۳ و ۴/۲۲ بود (شـــکل ۵ و جدول ۴). هر چند آسـتانه تحمل به تنش شـوری با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاســیم ســیلیکات کاهش یافت، امّا آســتانه تحمل به تنش شوری با کاربرد ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات در باقلا افزایش و شـیب کاهشـی آن تا حدودی کمتر شده است که نشـان‌دهنده افزایش تحمل به تنش شـوری در باقلا با اعمال پتاسیم سیلیکات است.

آنایا و همکاران (Anaya et al., 2018) گزارش کردند که بذرهای باقلا در مرحله جوانه‌زنی به تنش شوری حساس هستند که با نتـایج این پژوهش مطابقت دارد. یکی از حســـاس‌ترین مراحل رشد به تنش شوری در طول رشدونمو گیاه باقلا، مرحله جوانه‌زنی بذر است. جوانه‌زنی بذرها به‌شدت توسط تنش شوری مهار می‌شـود (Wu et al., 2019). تنش شـوری، جوانه‌زنی بذر را به دلایل مختلف کاهش می‌دهد. شـــوری رشـــد گیاهچه را به تأخیر می‌اندازد، فرآیندهای مهم ســـلولی را مختل می‌کند و با تغییر ســـرعت ســـبز شـــدن و رشـــد در اکثر گیاهان زراعی، بر ریخت‌شـناسـی گیاه در سـراسـر مرحله گیاهچه تأثیر می‌گذارد (El-Badri et al., 2021).



شکل ۴- همبستگی بین شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه

Fig. 4- Correlation between germination indices and seedling growth



شکل ۵- اثرات پتاسیم سیلیکات بر جوانه‌زنی نسبی بذرهای باقلا به تنش شوری براساس معادله ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)

Fig. 5- Effects of potassium silicate on relative germination of faba bean seeds under salinity stress based on the Maas & Hoffman, 1977; equation

براســاس مدل نمایی، بیشـــترین درصـــد جوانه‌زنی بذر باقلا با کـاربرد مقـادیر مختلف ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات به‌ترتیب ۸۹/۳۳، ۹۴/۹۴، ۹۷/۴۸ و ۹۴/۷۷ به دسـت آمد. سـطحی از تنش شـوری که باعث کاهش ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذر باقلا می‌شـــود با کاربرد مقادیر مختلف ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسـیم سـیلیکات براسـاس مدل لجسـتیک به‌ترتیب ۹/۳۷، ۹/۷۱، ۹/۸۷ و ۱۰/۳۰ دســی‌زیمنس بر متر و براســاس مدل ســیگموئیدی به‌ترتیب ۸/۷۵، ۹/۴۱، ۹/۳۸ و ۱۰/۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۵ و شکل ۶).

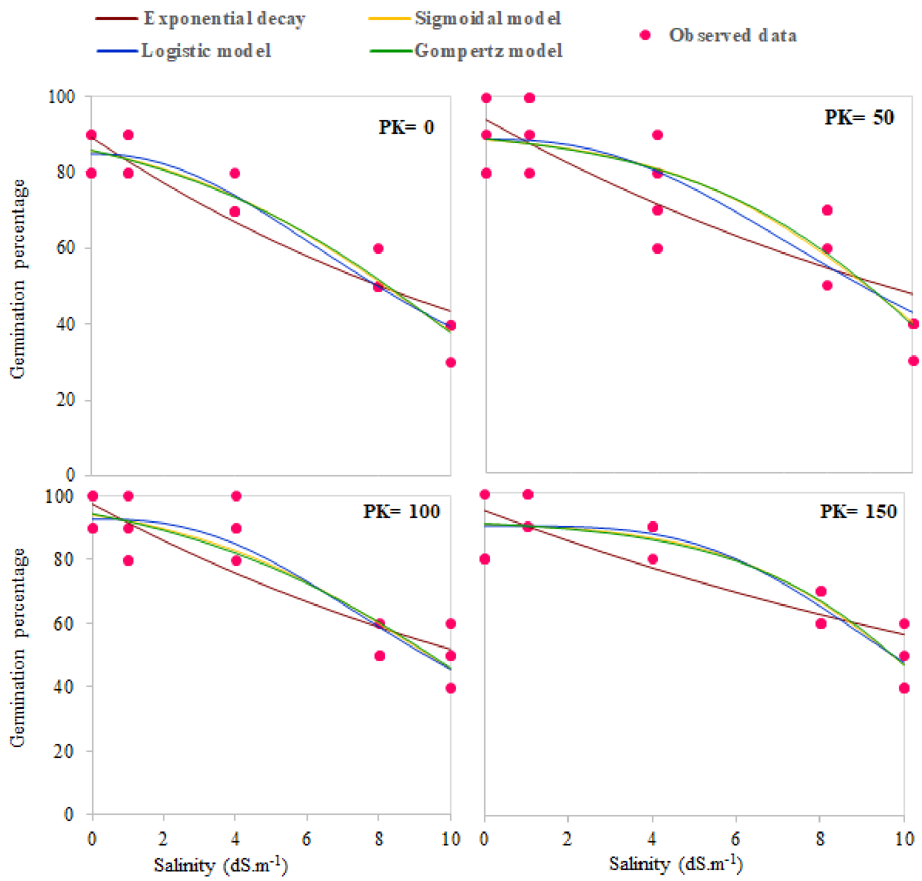
جدول ۴- پارامترهای معادله ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) برای جوانه‌زنی نسبی بذرهای باقلا به پتاسیم سیلیکات تحت تنش شوری

Table 4- Parameters of the Maas & Hoffman, 1977; equation for relative germination of faba bean seeds to potassium silicate under salinity stress

پتاسیم سیلیکات Potassium silicate	شیب مدل l	حد آستانه a_0	Adj R^2	RMSE
0	$5.48^{**} \pm 0.32$	$0.52^{ns} \pm 0.33$	0.94	5.51
50	$5.17^{**} \pm 0.58$	$0.62^{ns} \pm 0.62$	0.81	10.02
100	$4.93^{**} \pm 0.53$	$0.22^{ns} \pm 0.62$	0.82	9.10
150	$4.22^{**} \pm 0.50$	$1.32^{*} \pm 0.61$	0.78	8.74

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد؛ ns: غیرمعنی‌دار

*, and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively; ns: non significant



شکل ۶- روند جوانه‌زنی بذر باقلا تحت اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات و تنش شوری با استفاده از مدل‌های مختلف تجربی

Fig. 6- Germination process of faba bean seeds under the effects of pretreatment with potassium silicate and salinity stress using different experimental models

جدول ۵- پارامترهای مدل‌های مختلف به‌دست‌آمده برای جوانه‌زنی بذر باقلا تحت اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات و تنش شوری

Table 5- Parameters of different models obtained for bean seed germination under the effects of pretreatment with potassium silicate and salinity stress

پتاسیم سیلیکات Potassium silicate	نوع مدل	Model	Ymax± SE	Erate ± SE	EC50± SE	E_0 ± SE
0	مدل نمایی	Exponential decay	89.33** ± 2.49	0.07** ± 0.01		
	مدل لجستیک	Logistic model	84.98** ± 1.97	2.24** ± 0.37	9.37** ± 0.43	
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	92.76** ± 6.35	-3.50** ± 0.78	8.75** ± 0.57	
	مدل گامپرتز	Gompertz model	97.29** ± 9.26	-4.94** ± 1.41		10.28** ± 0.41
50	مدل نمایی	Exponential decay	93.94** ± 4.27	0.07** ± 0.01		
	مدل لجستیک	Logistic model	88.79** ± 3.83	2.53** ± 0.87	9.71** ± 0.79	
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	91.00** ± 6.35	-2.58* ± 0.97	9.41** ± 0.54	
	مدل گامپرتز	Gompertz model	92.36** ± 7.46	-3.24* ± 1.32		10.52** ± 0.50
100	مدل نمایی	Exponential decay	97.48** ± 3.84	0.06** ± 0.01		
	مدل لجستیک	Logistic model	92.74** ± 3.15	2.64** ± 0.75	9.87** ± 0.63	
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	100.32** ± 10.26	-3.46* ± 1.35	9.38** ± 0.79	
	مدل گامپرتز	Gompertz model	106.10** ± 17.31	-5.09ns ± 2.70		10.91** ± 0.67
150	مدل نمایی	Exponential decay	94.77** ± 3.98	0.05** ± 0.01		
	مدل لجستیک	Logistic model	89.98** ± 2.54	3.79** ± 1.16	10.30** ± 0.52	
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	91.36** ± 3.52	-2.16** ± 0.65	10.10** ± 0.37	
	مدل گامپرتز	Gompertz model	92.18** ± 4.19	-2.68** ± 0.89		11.03** ± 0.50

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد، ns: غیرمعنی‌دار

*, and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively, ns: non significant

برازش چهار مدل (مدل دو پارامتری نمایی، مدل سه پارامتری لجستیک، سیگموئیدی و گامپرتز) به داده‌های درصد جوانه‌زنی بذرهای باقلا تحت شرایط تنش شوری با کاربرد سطوح مختلف پتاسیم سیلیکات نشان داد که سه مدل لجستیک، سیگموئیدی و گامپرتز روند تقریباً یکسانی داشتند و به‌دلیل R^2 بالا قادر به ارائه توصیف خوبی از پاسخ جوانه‌زنی باقلا به تنش شوری در سطوح مختلف پتاسیم سیلیکات بودند. بیشترین ضریب تبیین (R^2= 0.93) درصد جوانه‌زنی باقلا به تنش شوری براساس مدل‌های لجستیک، سیگموئیدی و گامپرتز تحت شرایط عدم کاربرد پتاسیم سیلیکات مشاهده شد که این امر نشان‌دهنده این است که با توجه به مشاهدات، مدل مورد استفاده به احتمال ۹۳ درصد تغییرات درصد جوانه‌زنی باقلا به تنش شوری را درست پیش‌بینی نموده است. آماره دیگری که با استفاده از آن برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود، ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد که در سطوح مختلف پتاسیم سیلیکات، مقدار آن برای مدل‌های سه پارامتری (لجستیک، سیگموئیدی و گامپرتز) در مقایسه با مدل دو پارامتری نمایی کمتر می‌باشد که کم بودن مقدار آن نشان‌دهنده میزان دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جوانه‌زنی بذرهای باقلا است. همچنین مقدار ضریب آکائیک تصحیح‌شده برای مدل‌های سه پارامتری (لجستیک، سیگموئیدی و گامپرتز) در شرایط عدم کاربرد پتاسیم سیلیکات کمترین مقدار بود. بنابراین این مدل‌ها به‌خوبی توانستند که درصد جوانه‌زنی باقلا به تنش شوری در سطوح مختلف پتاسیم سیلیکات را شبیه‌سازی نمایند (جدول ۶).

جدول ۶- ارزیابی مدل‌های مختلف به‌دست‌آمده برای جوانه‌زنی بذر باقلا تحت اثرات پیش‌تیمار با پتاسیم سیلیکات و تنش شوری

Table 6- Evaluation of different models obtained for faba bean seed germination under the effects of pretreatment with potassium silicate and salinity stress

پتاسیم سیلیکات Potassium silicate	نوع مدل	Model	Adj R^2	RMSE	AIC	AICc
0	مدل نمایی	Exponential decay	0.89	6.67	-17.97	-17.27
	مدل لجستیک	Logistic model	0.93	5.29	-20.59	-19.09
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	0.93	5.14	-21.19	-19.69
	مدل گامپرتز	Gompertz model	0.93	5.11	-21.30	-19.80
50	مدل نمایی	Exponential decay	0.73	11.46	-7.14	-6.43
	مدل لجستیک	Logistic model	0.77	10.61	-6.68	-5.18
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	0.78	10.21	-7.44	-5.94
	مدل گامپرتز	Gompertz model	0.79	10.06	-7.74	-6.24
100	مدل نمایی	Exponential decay	0.76	10.35	-9.18	-8.47
	مدل لجستیک	Logistic model	0.83	8.80	-10.41	-8.91
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	0.81	9.23	-9.47	-7.97
	مدل گامپرتز	Gompertz model	0.80	9.38	-9.14	-7.64
150	مدل نمایی	Exponential decay	0.68	10.84	-8.26	-7.55
	مدل لجستیک	Logistic model	0.83	7.86	-12.68	-11.18
	مدل سیگموئیدی	Sigmoidal model	0.82	7.99	-12.34	-10.84
	مدل گامپرتز	Gompertz model	0.82	8.07	-12.16	-10.66

نتیجه‌گیری

ازآنجاکه گیاهان زراعی در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان در معرض تنش شوری قرار دارند، مرحله جوانه‌زنی یکی از مراحل حساس رشدی گیاه است که می‌تواند تحت تأثیر تنش شوری واقع شود. نمک در این مرحله خسارت جبران‌ناپذیری به گیاه وارد می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که گیاه زراعی باقلا در مرحله جوانه‌زنی به تنش شوری حساس است و با اعمال تنش شوری، شاخص‌های جوانه‌زنی بذر آن مانند درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و بنیه بذر کاهش می‌یابد، همچنین شاخص‌های رشد مانند طول و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه نیز تحت تنش شوری کاهش یافتند، امّا غلظت‌های مختلف پتاسیم سیلیکات (به‌ویژه غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم سیلیکات) باعث بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذرهای باقلا شدند. از مدل‌های مختلف تجربی برای تعیین حد آستانه تحمل به شوری در گیاه باقلا استفاده شد. آستانه تحمل به شوری در گیاه باقلا زیر یک برآورد گردید. شیب کاهش آن برابر ۴-۵ بود. مقدار شوری که در آن درصد جوانه‌زنی به ۵۰ درصد کاهش یافت بین ۹-۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. بنابراین می‌توان پیشنهاد نمود که از پتاسیم سیلیکات به‌عنوان یک روش امیدبخش برای کاهش اثرات شوری در مرحله جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه باقلا استفاده شود.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه ایلام به‌خاطر حمایت از انجام این رساله دکتری تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Abayechaw, D., & Wulchafo, K. (2020). Germination test and seed rate determination on pulse crops. *International Journal of Current Research and Academic Review*, *8*, 113-123. https://doi.org/10.20546/ijcrar.2020.805.012

Abdelkader, A. A., Khalil, M. S., & Mohamed, M. S. (2022). Simultaneous biodegradation of λ-cyhalothrin pesticide and *Vicia faba* growth promotion under greenhouse conditions. *AMB Express*, *12*(1), 44. https://doi.org/10.1186/s13568-022-01383-0

Afzal, M., Alghamdi, S. S., Migdadi, H. H., El-Harty, E., & Al-Faifi, S. A. (2022). Agronomical and physiological responses of faba bean genotypes to salt stress. *Agriculture*, *12*(2), 235. https://doi.org/10.3390/agriculture12020235

Ahmed, E. Z., & Sattar, A. M. A. E. (2024). Improvement of *Vicia faba* plant tolerance under salinity stress by the application of thiamine and pyridoxine vitamins. *Scientific Reports*, *14*(1), 22367. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72511-y

Anaya, F., Fghire, R., Wahbi, S., & Loutfi, K. (2018). Influence of salicylic acid on seed germination of *Vicia faba* L. under salt stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *17*(1), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.10.002

Anderson, D. R., & Burnham, K. P. (2002). Avoiding pitfalls when using information-theoretic methods. *The Journal of Wildlife Management*, *66*(3), 912-918. https://doi.org/10.2307/3803155

Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, *56*, 197-202. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006

Banakar, M. H., Ranjbar, G. H., & Sarafraz Ardakani, M. R. (2021). Determination of salt tolerance threshold of different fenugreek (*Trigonella Foenum-graecum* L.) ecotypes at germination stage using experimental models. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *34*(4), 861-882. (In Persian with English Abstract). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1400.34.4.10.3

Basra, S. M. A., Farooq, M., Tabassam, R., & Ahmad, N. (2005). Physiological and biochemical aspects of pre-sowing seed treatments in fine rice (*Oryza sativa* L.). *Seed Science and Technology*, *33*(3), 623-628. https://doi.org/10.15258/sst.2005.33.3.09

Bavarsadi, M., Modhej, A., & Majdam, M. (2017). Investigation the effect of salinity tension on germination, seedling growth and ionic content of alfalfa genotypes (*Medicago sativa* L.). *Crop Physiology Journal*, *9*(35), 121-136.

Bekhiet, A. M., Helmy, A. M., Fouda, S. E., & Azzam, C. R. (2022). Evaluation of salinity tolerance of some Egyptian *Faba bean* varieties during the germination stage. *Current Investigations in Agriculture and Current Research*, *10*, 1316-1328.

Cafaro, V., Alexopoulou, E., Cosentino, S. L., & Patane, C. (2023). Germination response of different castor bean genotypes to temperature for early and late sowing adaptation in the mediterranean regions. *Agriculture*, *13*(8), 1569. https://doi.org/10.3390/agriculture13081569

Chauhan, B. S. & Johnson, D. E. (2008). Germination ecology of Chinese sprangletop (*Leptochloa chinensis*) in the Philippines. *Weed Science*, 56(6), 820-825. https://doi.org/10.1614/WS-08-070.1

Dagar, J. C., Yadav, R. K., & Sharma, P. C. (Eds.). (2019). Research Developments in Saline Agriculture. p. 926. Singapore: Springer.

De la Reguera, E., Veatch, J., Gedan, K., & Tully, K. L. (2020). The effects of saltwater intrusion on germination success of standard and alternative crops. *Environmental and Experimental Botany*, *180*, 104254. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104254

Dhiman, P., Rajora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S. S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Gupta, O., Devanna, B. N., Tripathi, D. K., & Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, *162*, 110-123. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023

El Boukhari, M. E. M., Barakate, M., Choumani, N., Bouhia, Y., & Lyamlouli, K. (2021). Ulva lactuca extract and fractions as seed priming agents mitigate salinity stress in tomato seedlings. *Plants*, *10*(6), 1104. https://doi.org/10.3390/plants10061104

El-Badri, A. M., Batool, M., Mohamed, I. A., Khatab, A., Sherif, A., Wang, Z., Salah, A., Nishawy, E., Ayaad, M., Kuai, J., Wang, B., & Zhou, G. (2021). Modulation of salinity impact on early seedling stage via nano-priming application of zinc oxide on rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, *166*, 376-392. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.040

Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1981). The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology* (*Netherlands*), *9*(2), 373-409.

El-Mogy, M. M., Garchery, C., & Stevens, R. (2018). Irrigation with salt water affects growth, yield, fruit quality, storability and marker-gene expression in cherry tomato. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, *68*(8), 727-737. https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1473482

Etesami, H., & Adl, S. M. (2020). Can interaction between silicon and non–rhizobial bacteria help in improving nodulation and nitrogen fixation in salinity–stressed legumes? A review. *Rhizosphere*, *15*, 100229. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100229

Farooq, M., Hussain, M., Nawaz, A., Lee, D. J., Alghamdi, S. S., & Siddique, K. H. (2017a). Seed priming improves chilling tolerance in chickpea by modulating germination metabolism, trehalose accumulation

and carbon assimilation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *111*, 274-283. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.012

Farooq, M., Gogoi, N., Hussain, M., Barthakur, S., Paul, S., Bharadwaj, N., Migdadi, H. M., Alghamdi, S. S., & Siddique, K. H. (2017b). Effects, tolerance mechanisms and management of salt stress in grain legumes. *Plant Physiology and Biochemistry*, *118*, 199-217. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.020

Gao, H. J., Yang, H. Y., Bai, J. P., Liang, X. Y., Lou, Y., Zhang, J. L., Wang, D., Zhang, J. L., Niu, S. Q., & Chen, Y. L. (2015). Ultrastructural and physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 787. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00787

Gong, D., Zhang, X., Yao, J., Dai, G., Yu, G., Zhu, Q., Guo, Q., & Zheng, W. (2021). Synergistic effects of bast fiber seedling film and nano-silicon fertilizer to increase the lodging resistance and yield of rice. *Scientific Reports*, *11*(1), 12788. https://doi.org/10.1038/s41598-021-92342-5

Hafez, E. M., Osman, H. S., El-Razek, U. A. A., Elbagory, M., Omara, A. E. D., Eid, M. A., & Gowayed, S. M. (2021). Foliar-applied potassium silicate coupled with plant growth-promoting rhizobacteria improves growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, *10*(5), 894. https://doi.org/10.3390/plants10050894

Ibrahim, E. A. (2016). Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *Journal of Plant Physiology*, *192*, 38-46. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.12.011

ISTA. (2010). International Rules for Seed Testing, Rules, 2010. International Seed Testing Association (ISTA) Seed Science and Technology. Zurich. Switzerland.

Johnston, C., Leong, S. Y., Teape, C., Liesaputra, V., & Oey, I. (2024). Low-intensity pulsed electric field processing prior to germination improves *in vitro* digestibility of faba bean (*Vicia faba* L.) flour and its derived products: A case study on legume-enriched wheat bread. *Food Chemistry*, *449*, 139321. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139321

Karunakaran, G., Suriyaprabha, R., Manivasakan, P., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Prabu, P., & Kannan, N. (2013). Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. *IET Nanobiotechnology*, *7*(3), 70-77. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2012.0048

Kaur, S., Suhalia, A., Sarlach, R. S., Shamshad, M., Singh, P., Grover, G., Brar, A., & Sharma, A. (2022). Uncovering the Iranian wheat landraces for salinity stress tolerance at early stages of plant growth. *Cereal Research Communications*, *50*(4), 895-904. https://doi.org/10.1007/s42976-022-00245-6

Keshtiban, R. K., Carvani, V., & Imandar, M. (2014). Effects of salinity stress and drought due to different concentrations of sodium chloride and polyethylene glycol 6000 on germination and seedling growth characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Advances in Environmental Biology*, *8*(24), 413-420.

Kuai, J., Sun, Y., Guo, C., Zhao, L., Zuo, Q., Wu, J., & Zhou, G. (2017). Root-applied silicon in the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. *Field Crops Research*, *200*, 88-97. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.007

Kukric, T. N., Marjanovic, J. A. M., Nikolic, Z. T., & Jovicic, D. D. (2023). A comparative study on salt stress response of *Camelina sativa* and *Carthamus tinctorius* during germination. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, *68*(2), 141-154. https://doi.org/10.2298/jas2302141k

Latef, A. A. A., Hasanuzzaman, M., & Tahjib-Ul-Arif, M. (2021). Mitigation of salinity stress by exogenous application of cytokinin in faba bean (*Vicia faba* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *49*(1), 12192-12192. https://doi.org/10.15835/nbha49112192

Lotfi, R., & Ghassemi-Golezani, K. (2015). Influence of salicylic acid and silicon on seed development and quality of mung bean under salt stress. *Seed Science and Technology*, *43*(1), 52-61. https://doi.org/10.15258/sst.2015.43.1.06

Luyckx, M., Hausman, J. F., Lutts, S., & Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 411. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411

Maalouf, F., Ahmed, S., & Bishaw, Z. (2021). Faba bean. In The Beans and the Peas. pp. 105-131. Woodhead Publishing.

Maas, E. V., & Grattan, S. R. (1999). Crop yields as affected by salinity. *Agricultural Drainage*, *38*, 55-108. https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c3

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *103*(2), 115-134. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137

Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, *2*, 176-177. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

Meot-Duros, L., & Magne, C. (2008). Effect of salinity and chemical factors on seed germination in the halophyte *Crithmum maritimum* L. *Plant and Soil*, *313*, 83-87. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9681-6

Mustafa, G., Akhtar, M. S., & Abdullah, R. (2019). Global concern for salinity on various agro-ecosystems. *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solution*, *1*, 1-19. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8801-9_1

Naseer, M. N., Rahman, F. U., Hussain, Z., Khan, I. A., Aslam, M. M., Aslam, A., Waheed, H., Khan, A. U., & Iqbal, S. (2022). Effect of salinity stress on germination, seedling growth, mineral uptake and chlorophyll contents of three Cucurbitaceae species. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *65*, e22210213. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210213

Netondo, G. W., Onyango, J. C., & Beck, E. (2004). Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. *Crop Science*, *44*(3), 806-811. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.8060

Nirmala, S., Mukesh, Y., Venkataraman, B. K., Kumar, S. R., & Kumar, J. P. (2016). Hybridization between salt resistant and salt susceptible genotypes of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and purity testing of the hybrids using SSRs markers. *Journal of Integrative Agriculture*, *15*(3), 521-527. https://doi.org/10.1016/S2095-3119%2815%2961161-3

Omar, S. A., Feng, Y., Yu, M., Eldin, S. A. G., Eldenary, M. E., Shabala, S., Allakhverdiev, S., & Abdelfattah, M. H. (2024). Exogenous application of 5-azacitidin, royal jelly and folic acid regulate plant redox state, expression level of DNA methyltransferases and alleviate adverse effects of salinity stress on *Vicia faba* L. plants. *Heliyon*, *10*(10). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30934

Rawat, J., Sanwal, P., & Saxena, J. (2016). Potassium and its role in sustainable agriculture. In Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. pp. 235-253. New Delhi: Springer India.

Saadat, H., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2023). The effect of priming with different levels of chitosan on physiological and biochemical traits in french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salinity stress. *Plant Production Technology*, *14*(2), 75-89. (In Persian). https://doi.org/10.22084/ppt.2023.26100.2075

Sabaghnia, N., & Janmohammadi, M. (2014). Graphic analysis of nano-silicon by salinity stress interaction on germination properties of lentil using the biplot method. *Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i Sumarstv*, *60*(3), 29-40.

Sahab, S., Suhani, I., Srivastava, V., Chauhan, P. S., Singh, R. P., & Prasad, V. (2021). Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: Current status and management strategies. *Science of the Total Environment*, *764*, 144164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144164

Sehrawat, N., Yadav, M., Singh, R., Aggarwal, D., & Devi, A. (2020). Drought and salinity stress as major threat for sustainable Mung bean production: Emerging challenges and future perspectives. *Annals of Plant Sciences*, *9*(6), 3899-3906.

Shahzad, M., Zorb, C., Geilfus, C. M., & Muhling, K. H. (2013). Apoplastic Na^+ in *Vicia faba* leaves rises after short-term salt stress and is remedied by silicon. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *199*(3), 161-170. https://doi.org/10.1111/jac.12003

Sharma, A. D., Rathore, S. V. S., Srinivasan, K., & Tyagi, R. K. (2014). Comparison of various seed priming methods for seed germination, seedling vigour and fruit yield in okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench). *Scientia Horticulturae*, *165*, 75-81. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.044

Sharma, A. D., Thakur, M., Rana, M., & Singh, K. (2004). Effect of plant growth hormones and abiotic stresses on germination, growth and phosphatase activities in *Sorghum bicolor* (L.) Moench seeds. *African Journal of Biotechnology*, *3*(6), 308-312. https://doi.org/10.5897/AJB2004.000-2057

Shen, Q., Fu, L., Su, T., Ye, L., Huang, L., Kuang, L., Wu, L., Wu, D., Chen, Z., Zhang, G., & Zhang, G. (2020). Calmodulin HvCaM1 negatively regulates salt tolerance via modulation of HvHKT1s and HvCAMTA4. *Plant Physiology*, *183*(4), 1650-1662. https://doi.org/10.1104/pp.20.00196

Tao, Q., Lv, Y., Mo, Q., Bai, M., Han, Y., & Wang, Y. (2018). Impacts of priming on seed germination and seedling emergence of *Cleistogenes songorica* under drought stress. *Seed Science and Technology*, *46*(2), 239-257. https://doi.org/10.15258/sst.2018.46.2.06

Tavakkoli, E., Watts-Williams, S. J., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2024). Eliciting the aboveground physiological regulation that underlies salinity tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Environmental and Experimental Botany*, *226*, 105849. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105849

Van Genuchten, M. V., & Hoffman, G. J. (1984). Analysis of crop salt tolerance data. p. 285-271, In: I. Shainberg and J. Shalhevet (eds.). Soil Salinity under Irrigation- Process and Management. Springer-Verlag, NewYork, NY.

Wang, X. D., Ou-yang, C., Fan, Z. R., Gao, S., Chen, F., & Tang, L. (2010). Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *6*(3), 700-708.

Wu, H., Guo, J., Wang, C., Li, K., Zhang, X., Yang, Z., Li, M., & Wang, B. (2019). An effective screening method and a reliable screening trait for salt tolerance of *Brassica napus* at the germination stage. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 530. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00530

Zaid, A., Gul, F., Ahanger, M. A., & Ahmad, P. (2018). Silicon-mediated alleviation of stresses in plants. In Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress. pp. 377-387. Academic Press.

Zaki, F. S., Elsayed, A. E., Ahmed, A. M., & Khalid, K. A. (2024). Salinity stress and different types of nano silicon's effects on lupine morphology and biochemical accumulations. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *55*, 102997. http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102997

Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., Xiao, F., Lin, H., & Guo, Y. (2024). Insights into plant salt stress signaling and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics*, *51*(1), 16-34. https://doi.org/10.1016/j.jgg.2023.08.007